

ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LOS AISLADORES DE LA UFA-ESPE

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS ISOLATORS AT UFA-ESPE

Roberto Aguiar⁽¹⁾, Enrique Morales⁽²⁾, Iván Delgado⁽¹⁾

⁽¹⁾Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Universidad de Fuerzas Armadas ESPE

Av. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí. Quito, Ecuador

Correo Electrónico: ranguiar@espe.edu.ec

⁽²⁾Departamento de Ing. Civil

Universidad de Buffalo

RESUMEN

El análisis de una estructura aislada requiere de un modelo matemático que proporcione curvas fuerza-desplazamiento que permitan idealizar el comportamiento no lineal del aislador. La propuesta tiene como finalidad usar un modelo simple utilizando las propiedades del mismo y validarlo con datos experimentales de un proyecto real, que permita contar con un modelo que estima en forma razonable el comportamiento del aislador. Se presenta un modelo de análisis sísmico de aisladores de triple péndulo de fricción, el mismo que es validado con el ensayo de 81 aisladores, sometidos cada uno a tres ciclos de carga, con una duración de 12 segundos. Por otra parte, se analiza la variación de: coeficiente de rozamiento, rigidez efectiva, factor de amortiguamiento y período de vibración, encontrados en forma experimental y con el modelo propuesto en los 81 FPT.

Palabras Claves: Aisladores de Triple Péndulo de Fricción.

ABSTRACT

The analysis of an isolated structure required a mathematical model to provide lateral force – displacement curves allowing to idealize the nonlinear behavior of the device. The proposal aims to use a simple model using its mechanical properties and validate it with experimental data of a real project, allowing to have a model that estimates in a reasonable manner the behavior of insulator. We present a model for seismic analysis of a triple friction pendulum, which is validated with the trial of 81 devices, subjected each to three cycles, with a duration of 12 seconds. On the other hand, is analyzed the variation of coefficient of friction, effective stiffness, damping factor and vibration period, found experimentally and with the model proposed in the 81 FPT.

Key words: Triple friction pendulum

INTRODUCCION

Terremotos recientes han demostrado que, incluso modernos códigos han limitado los daños en elementos estructurales, pero la mayor concentración de pérdidas se concentra en los daños en los componentes y elementos no estructurales, así como en la pérdida de funcionalidad (Zayas 2013). Ante esta realidad, es importante considerar sistemas como el aislamiento de base que permite limitar el daño estructural y en componentes y elementos no estructurales, permitiendo con esto que las estructuras logren niveles de desempeño óptimos reduciendo las pérdidas. (Aguiar *et al.* 2008, Kawamura *et al.* 2000)

Los dispositivos de aislamiento de base, los cuales principalmente se han concentrado en dos tipos como son los llamados elastómeros y friccionales (Naeim and Kelly, 1999). Los primeros en este caso, los elastoméricos han sido desarrollados e implementados inicialmente existiendo principalmente tres tipos de aisladores elastómeros y son los conocidos como: Low Damping Rubber Bearing; High Damping Rubber Bearing y Lead Rubber. (Constantinou 2012).

De igual manera los friccionales se pueden clasificar en tres tipos: Simple Concave Friction Pendulum Bearing; Double Concave Friction Pendulum Bearing; Triple Concave Friction Pendulum Bearing. La investigación continúa y es así como acaba de aparecer los denominados: Quinto Péndulo de Fricción. (Lee y Constantinou 2016)

Cabe mencionar que pese a las ventajas y a las aplicaciones existentes (Chistopoulous 2006), existen limitaciones en su aplicación o límites, principalmente para estructuras muy esbeltas, con una gran cantidad de pisos, por el efecto $P - \Delta$. Además de lo relacionado a la componente vertical que afecta a elementos no estructurales como son los cielos rasos; este tema ha sido investigado en el laboratorio en Japón, E-Defense (2011).

Nos centraremos en los aisladores friccionales de triple péndulo de fricción FPT, ya que serán los que se coloquen en los nuevos Centros de Investigación, de la Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE. (UFA-ESPE). Estos aisladores combinan superficies de fricción con fuerzas de restauración por la geometría de los mismos (Fenz 2006).

Los aisladores friccionales dobles y triples llamados de segunda y tercera generación respectivamente, tienen algunas ventajas, por ejemplo son más compactos, capaces de adaptar su desempeño en relación a la demanda, aumentar la capacidad de desplazamiento, reducir la velocidad en el movimiento, con lo cual se evita variación en los coeficientes de fricción. Otro aspecto notable del aislador de segunda generación con respecto al de primera es que se reduce las respuestas estructurales mejorando el desempeño de los componentes y elementos no estructurales. (Fenz y Constantinou 2008).

Los aisladores de triple péndulo de fricción están conformado por un aislador interior de radios de curvatura R_2, R_3 , dentro de otro aislador cuyas placas exteriores tienen radios R_1, R_4 . De tal manera que se tiene dos aisladores en uno solo. Esto permite que tengan menores dimensiones con respecto a los de primera

En la UFA-ESPE se están construyendo 6 Bloques Estructurales con aisladores FPT8833/12-12/8-6, el mismo que se indica en la figura 1. En total se necesitaron 81 aisladores los mismos que fueron ensayados considerando tres cargas verticales de 250, 200 y 100 T. (EPS 2015).

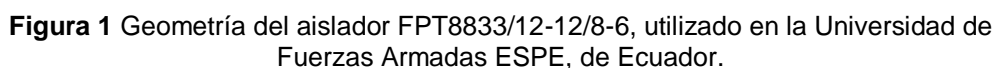


Figura 2 Implantación General del Centro de Investigación y Posgrado de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE).

En la figura 3 se muestra el avance general de cada bloque estructural, el proyecto está en su fase de montaje de estructura metálica y construcción de accesos principales la obra presenta un avance general del 40 %.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 3 a) Estado Actual del Bloque 1 montaje de estructura metálica b) Estado Actual de Bloque 2 y 3 montaje de aisladores en primera planta c) Estado Actual del Bloque 4 y 5 construcción de accesos d) Estado Actual del Bloque 6 y 7 montaje de correas e) Estado Actual del bloque 8 colocación de losa tipo deck.

MODELO DE TRES FASES

Los radios de curvatura de las placas exteriores e interiores del aislador FPT pueden ser diferentes al igual que las alturas h_i con lo que la capacidad de desplazamiento d_i son diferentes (para $i = 1:4$); con lo que se tiene 12 condiciones geométricas y cuatro condiciones de roce μ_i diferentes en cada una de las placas. En este caso el modelo de cinco fases propuesto por Fenz y Constantinou (2007, 2008); Fadi y Constantinou (2010) es el más adecuado.

Ahora para el caso del aislador FPT8833/12-12/8-6. Las condiciones geométricas se reducen a 6 debido a que los radios de curvatura de las placas exteriores son iguales y lo propio sucede con los radios de las placas interiores; algo similar se tiene con las alturas y la capacidad de desplazamiento como se observa en la figura 1. Se puede tener dos coeficientes de roce uno para las placas exteriores y uno para las placas interiores. Para estas condiciones Mc Vitty y Constantinou (2015) propusieron un modelo de tres fases para definir las curvas de histéresis que relacionan el desplazamiento horizontal con la fuerza de corte. Las ecuaciones que definen este modelo, son:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \quad \text{Para } i \text{ de } 1 \text{ a } 4. \quad (1)$$

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} \quad (2)$$

Donde R_i es el radio de curvatura; h_i es la altura, presentada en la figura 1; $R_{i,eff}$ es el radio de curvatura efectivo; d_i^* es la capacidad de desplazamiento. El subíndice i , varía de 1 a 4. A continuación se indican las 3 fases o regímenes del modelo.

- **Régimen I**

El desplazamiento se da solamente en las placas 2 y 3.

$$0 \leq u \leq u^*$$

$$u^* = 2 (\mu_1 - \mu_2) R_{2,eff} \quad (3)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,eff}} u + \mu_2 W \quad (4)$$

Donde u es el desplazamiento lateral del aislador; F es la fuerza lateral aplicada; W es el peso que gravita sobre el aislador. A la izquierda de la figura 4 se aprecia al aislador interior desplazándose en las superficies 2 y 3; a la derecha se muestra el diagrama de histéresis correspondiente.

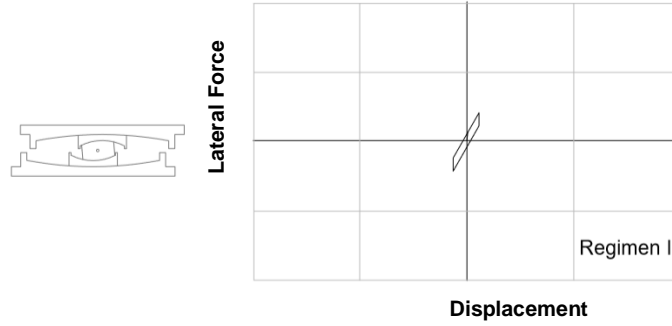


Figura 4 Desempeño de aislador en Régimen I.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

- **Régimen II**

El movimiento en el aislador interior llega a los topes y empieza a desplazarse en las superficies 1 y 4. Normalmente es en este régimen en que trabaja un aislador ante un sismo de intensidad moderada y alta. Las ecuaciones se indican a continuación y en la figura 5 se presenta la curva de histéresis correspondiente.

$$u^* \leq u \leq u^{**}$$

$$u^{**} = u^* + 2 d_1^* \quad (5)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{1,eff}} (u - u^*) + \mu_1 W \quad (6)$$

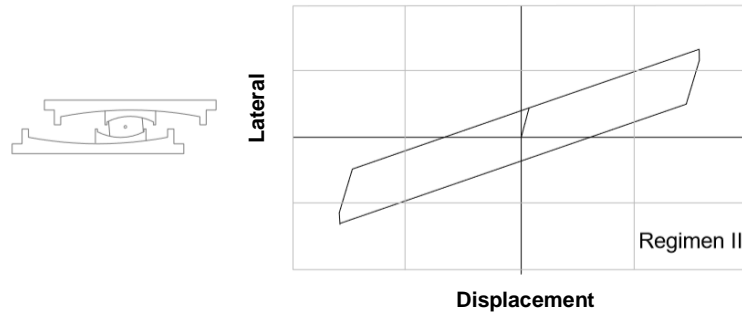


Figura 5 Desempeño de aislador en Régimen II.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

- **Régimen III**

Este régimen se presenta cuando el sismo es extremadamente fuerte y el aislador interior se topa con los topes exteriores, en estas condiciones empieza a

deslizarse el aislador interior en las superficies 2 y 3. Las ecuaciones de cálculo y el desempeño se indican en la figura 6.

$$u^{**} \leq u \leq u_{cap}$$

$$u_{cap} = 2 d_1^* + 2 d_2^* \quad (7)$$

$$F = \frac{W}{2 R_{2,1ff}} (u - u^{**}) + \frac{W}{2 R_{1eff}} (u^{**} - u^*) + \mu_1 W \quad (8)$$

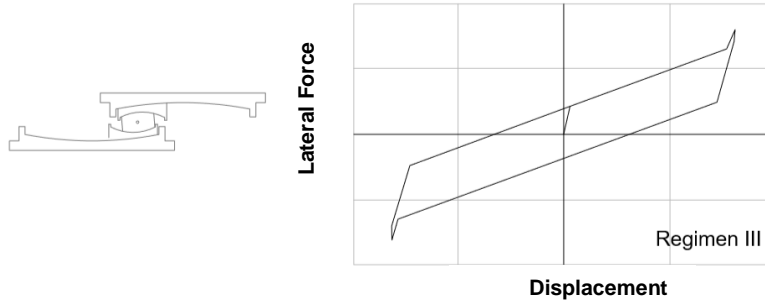


Figura 6 Desempeño de aislador en Régimen III.
Fuente: Mc Vitty y Constantinou (2015)

MODELO PROPUESTO

El modelo que se propone es exclusivo para la fase II, donde va a trabajar el aislador, por lo regular. Pero puede ser aplicado también para la fase I. Cabe indicar que difiere del modelo indicado por propuesto por Mc Vitty y Constantinou (2015), primero que no se considera un valor de resistencia a cero desplazamiento igual a Q_d que es función de la fricción y del peso y también en la descarga no se considera la línea vertical de longitud $2 Q_d$, en lugar de ello se considera una línea inclinada como se verá posteriormente.

En la figura 7 a) se presenta el modelo propuesto por Mc Vitty y Constantinou (2015) para la fase II, se aprecia que cuando se inicia la descarga lo hace con una línea vertical indicada en el párrafo anterior y luego con una línea inclinada cuya pendiente es la misma que la rigidez elástica.

Ahora, se propone en la figura 7 b) que cuando se inicia la descarga se lo haga directamente con una rigidez igual a la rigidez elástica. Es decir que se trabaje con un modelo bilineal cuyo coeficiente de fricción viene definido por la siguiente ecuación.

$$\mu = \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2ef}}{R_{1ef}} \quad (9)$$

Donde μ_1, μ_2 , son los coeficientes de roce de las placas exterior e interior; μ es el coeficiente de roce equivalente.

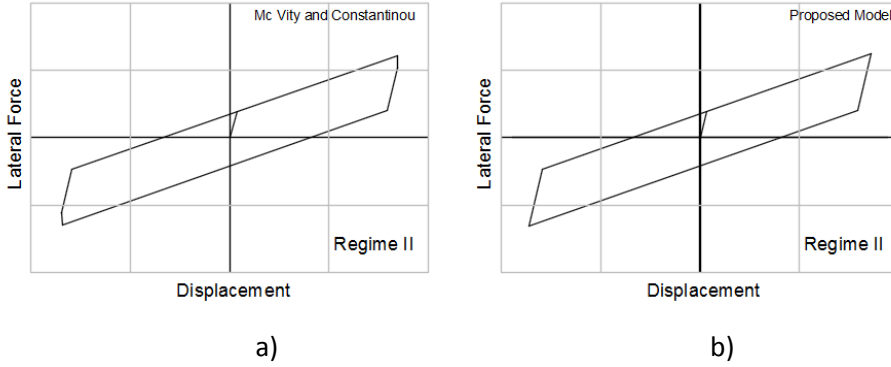


Figura 7 Modelos para la fase dos: a) propuesta de Mc Vitty y Constantinou (2015) y b) modelo propuesto en este estudio.

Las ecuaciones que definen modelo bilineal, son las siguientes:

$$\xi_{eq} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{\mu + \frac{q}{R_1}} \quad (10)$$

$$k_p = \frac{W}{R_1} \quad (11)$$

$$F = \mu W + k_p q \quad (12)$$

$$k_{ef} = \frac{F}{q} \quad (13)$$

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{W}{g k_{ef}}} \quad (14)$$

Donde W es la carga vertical que gravita en el aislador; q es el desplazamiento lateral en el aislador que se lo obtiene en forma interactiva; ξ_{eq} es el factor de amortiguamiento equivalente; k_{ef} es la rigidez efectiva o rigidez secante; T es el período del aislador; g es la aceleración de la gravedad.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 8 a) se observa parte de los 81 aisladores FPT adquiridos por la UFA-ESPE a EPS, en la 8 b) el transporte de 4 de ellos en un monta carga hacia el área del ensayo; en la 8 c) se observa un aislador, sin la protección exterior durante el ensayo y en la 8 d) la curva de histéresis que relaciona los desplazamientos con las fuerza lateral en los ciclos tres ciclos de carga que tuvieron una duración de 12 segundos y un desplazamiento lateral que se halla alrededor de las 12 pulgadas.

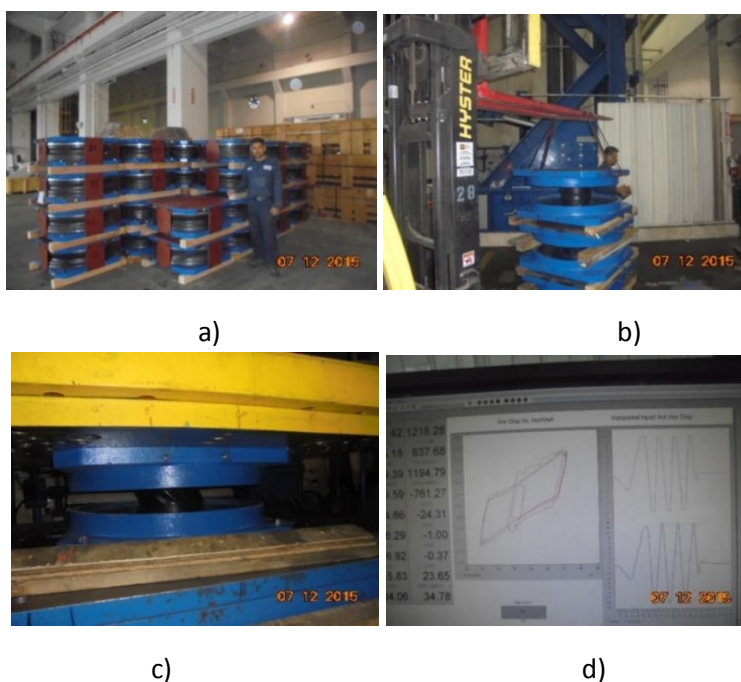
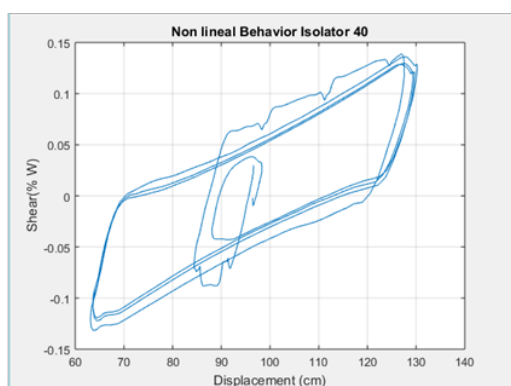
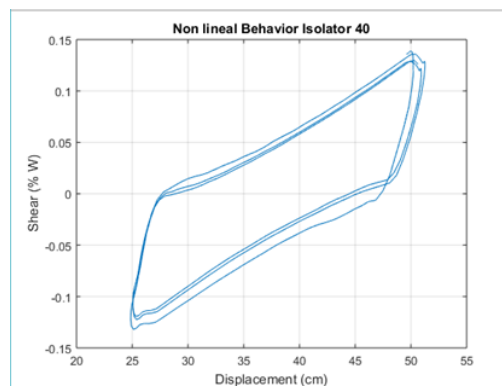


Figura 8 a) Parte de los aisladores de UFA-ESPE; b) transporte de los aisladores para ser ensayados; c) ensayo de un aislador; d) relaciones desplazamiento fuerza y ciclos de carga aplicados.

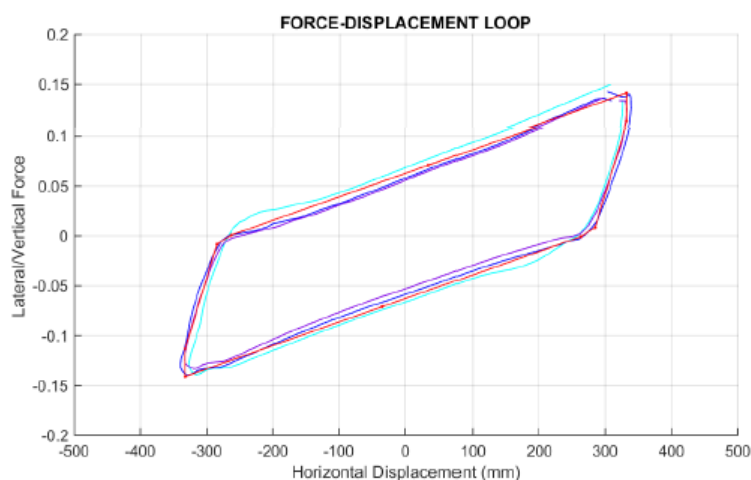
Los aisladores por efecto del movimiento (figura 8 b), ocasionan que la base rígida y el aislador interior se muevan, de tal manera que no se encuentran centrados para lograr que estén completamente en la posición original, manualmente se asigna un ciclo de carga lo que se obteniendo la gráfica de la figura 9 a), con líneas que luego son eliminadas, lo propio sucede con la parte final del ensayo hasta que vuelva a su posición inicial con lo que el desplazamiento lateral es cero, figura 9 b).



a)



b)



c)

Figura 9 a) Curva inicial que contempla cojinete descentrado; b) Curva en la que se ha eliminado la carga dada manualmente; c) aproximación de un modelo numérico a los resultados experimentales.

Relación Cortante expresado en función de la carga vertical vs desplazamiento horizontal de aislador 40.

Finalmente, se encuentra una curva que mejor se ajuste a los tres ciclos de carga, en base a la cual se determina los coeficientes de roce, siguiendo el modelo de cinco fases de Fenz y Constantinou (2007, 2008). Para el aislador FPT8833/12-12/8-6 en la figura 8 se presenta la curva de histéresis correspondiente.

En la figura 10, f_1 corresponde al coeficiente de roce del aislador interior que se ha denominado μ_2 ; f_2, f_3 , a los coeficientes de roce de las placas exteriores denominadas μ_1, μ_4 . Experimentalmente se determinan estos coeficientes de roce y de acuerdo al modelo de cinco fases, EPS (2015), determinó la rigidez efectiva, k_{ef} , el factor de amortiguamiento equivalente ξ_{eq} y el período de vibración T , asociados al desplazamiento lateral de 12".

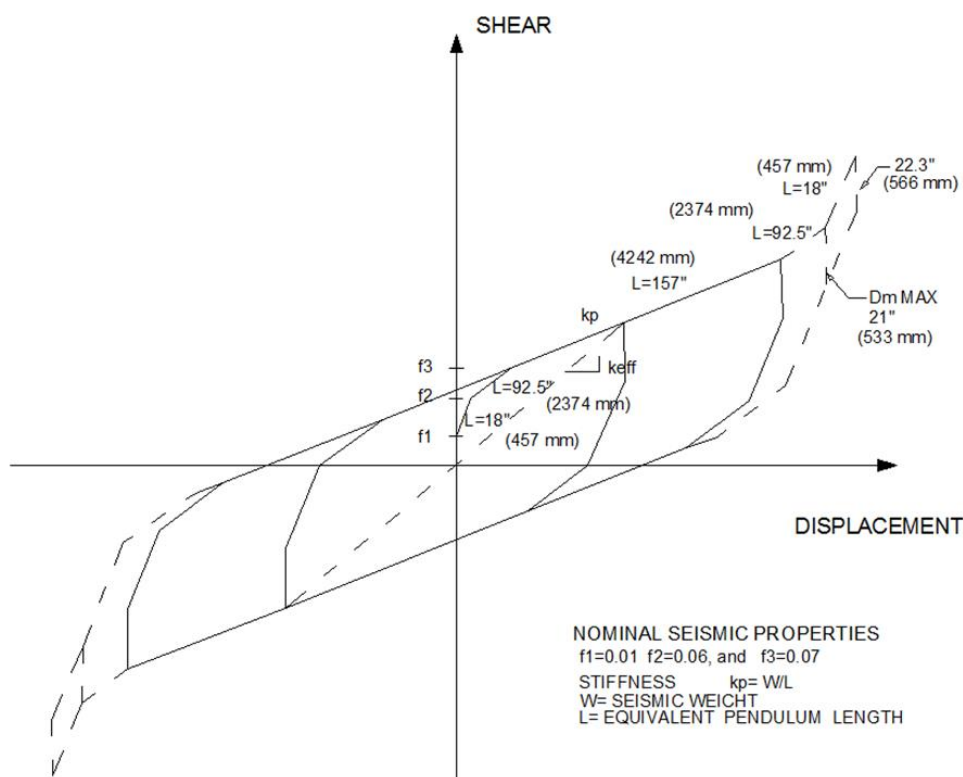


Figura 10 Curva de histéresis corte desplazamiento de aislador FPT8833/12-12/8-6

Fuente: EPS (2015)

RESULTADOS

Con los coeficientes de roce, obtenidos experimentalmente, EPS (2015) encontró la rigidez efectiva, el amortiguamiento equivalente y el período del aislador asociados al desplazamiento de 12", utilizando el modelo de 5 fases. Ahora en este estudio se encuentran los parámetros indicados, empleando el modelo bilineal propuesto.

EPS (2015) reporta los coeficientes de roce en cada ciclo de histéresis y el valor promedio, para cada uno de los 81 aisladores sísmicos FPT. Es importante indicar que 61 aisladores fueron ensayados con una carga vertical de 250 T. A otros 10 aisladores se los ensayó con una carga vertical de 200 T. A los 10 restantes se les aplicó una carga de 100 T.

Se obtuvieron tres tipos de curvas, una para valores promedios del coeficiente de roce, otra para valores máximos y otra para valores mínimos.

5.1 Coeficientes de Fricción.

En la figura 11 se compara los valores de Coeficientes de Fricción cuando la carga vertical es de 250 T. Los valores hallados experimentalmente son producto de los 61 ensayos realizados por EPS.

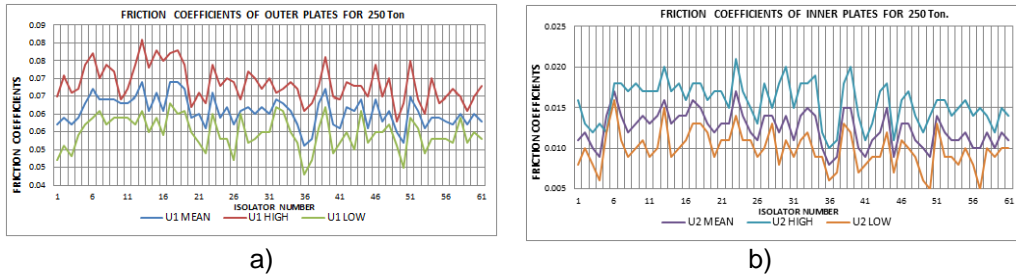


Figura 11 Comparación de coeficientes de fricción para 250 T de carga vertical, a) Coeficientes de fricción de las placas exteriores (u_1): valores medios, valores altos y valores mínimos b) Coeficientes de fricción de las placas interiores (u_2): valores medios, valores altos y valores mínimos

En la figura 12 se compara los valores de Coeficientes de Fricción cuando la carga vertical es de 200 T y 100 T. Los valores hallados experimentalmente son producto de los 20 ensayos realizados por EPS.

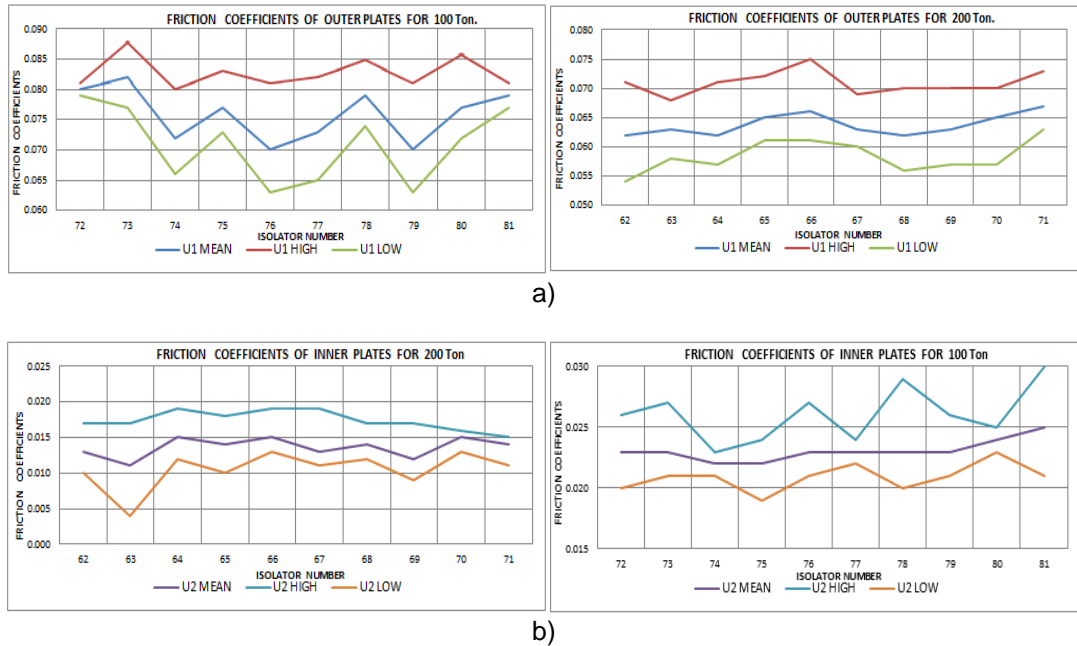


Figura 12 Comparación de coeficientes de fricción para 200 T y 100 T de carga vertical, a) Coeficientes de fricción de las placas exteriores (u_1): valores medios, valores altos y valores mínimos b) Coeficientes de fricción de las placas interiores (u_2): valores medios, valores altos y valores mínimos

5.2 Rigidez efectiva

En la figura 13 se compara la rigidez efectiva cuando la carga vertical es de 250 T hallada con valores: máximos, mínimos y promedios de coeficiente de fricción. Se encontró que los valores hallados experimentalmente son ligeramente mayores a los encontrados con el modelo bilineal propuesto. La mayor diferencia con los dos modelos es menor al 4%.

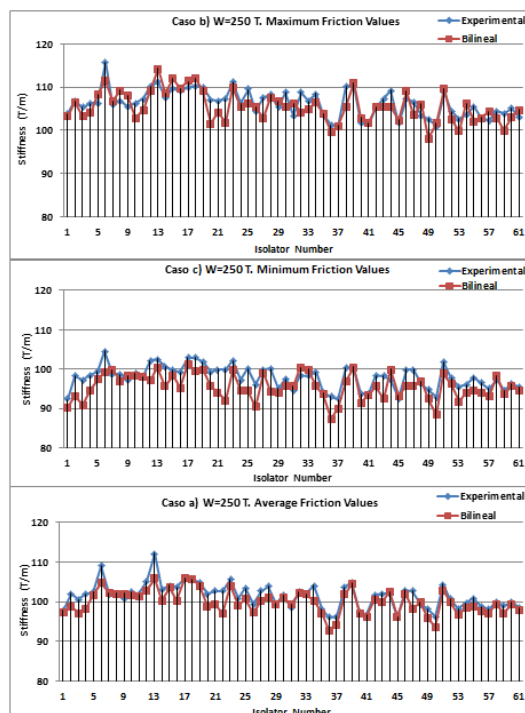


Figura 13 Comparación de rigidez efectiva, para 250 T., de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

En las figuras 14 se comparan la rigidez efectiva, cuando la carga vertical es de 200 T. (gráficos de la izquierda) y 100 T. (gráficos de la derecha), respectivamente y se encuentra un comportamiento similar, aunque para algunos casos la rigidez efectiva que se halla es igual con los dos modelos.

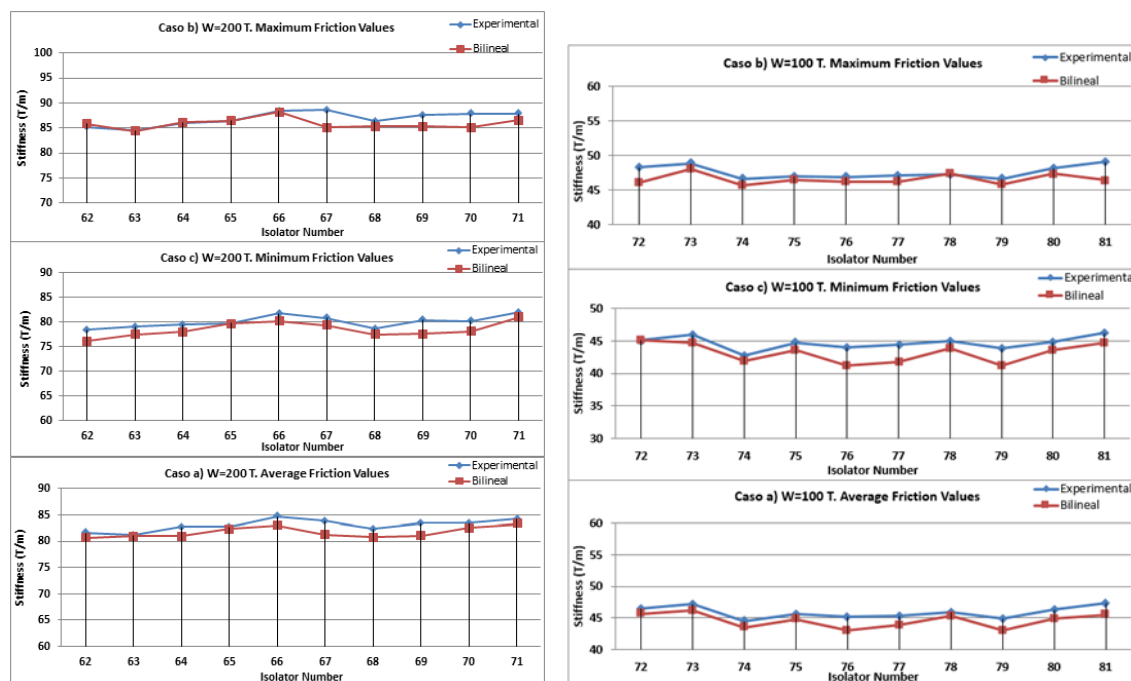


Figura 14 Comparación de rigidez efectiva, para 200 T. (izquierda) y 100 T. (derecha), de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

5.3 Factor de amortiguamiento equivalente

En las figuras 15 y 16 se presentan los factores de amortiguamiento hallados para carga vertical de 250 T. (61 ensayos); 200 T. (10 ensayos) y 100 T. (10 ensayos). Se observa que el factor de amortiguamiento equivalente encontrado con el modelo propuesto es ligeramente mayor que el encontrado en forma experimental.

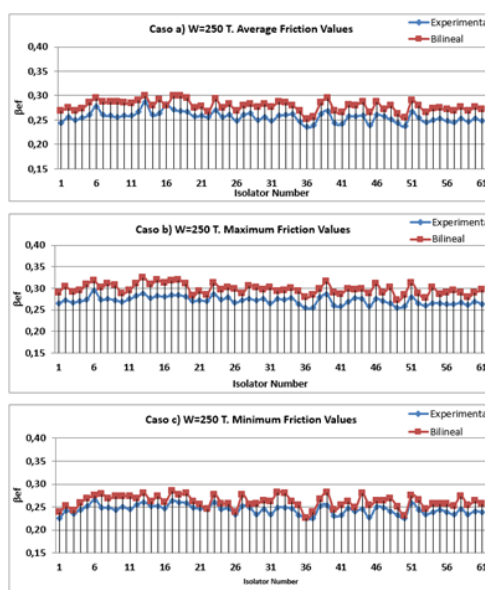


Figura 15 Comparación de factor de amortiguamiento equivalente, para carga vertical de 250 T., de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

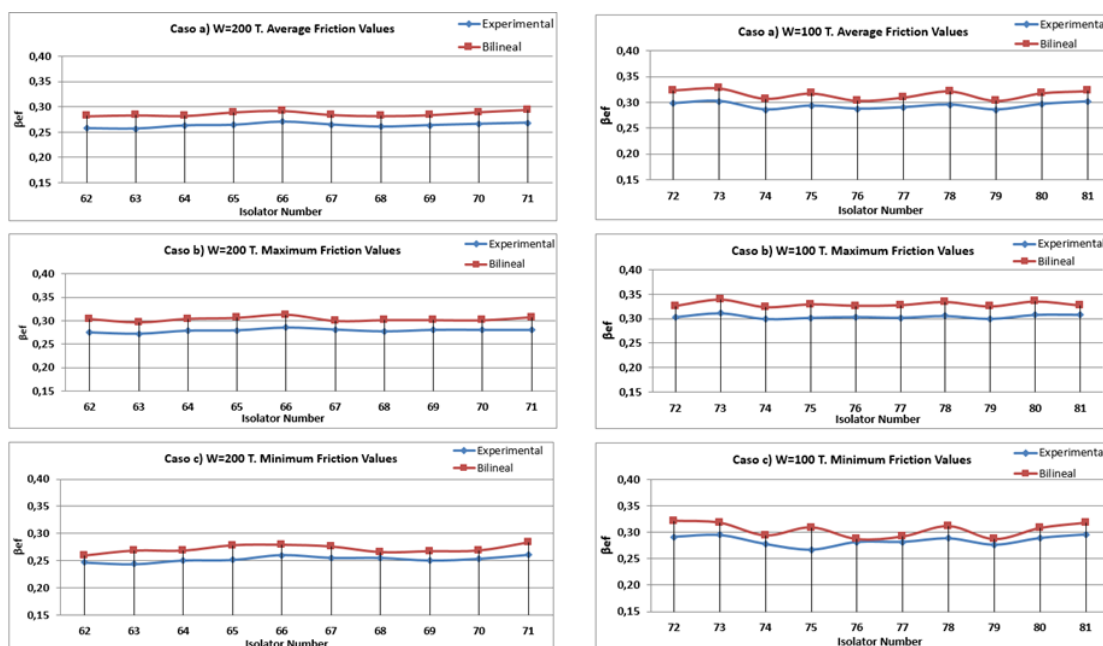


Figura 16 Comparación de factor de amortiguamiento equivalente, para carga vertical de 200 T. (izquierda) y 100 T. (derecha), de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

5.3 Período de vibración

En la figura 17 se presentan los períodos del aislador cuando la carga vertical es de 250 T., y en la figura 16 cuando la carga vertical es de 200 T. (izquierda) y de 100 T. (derecha). En el siguiente apartado se comenta sobre los resultados obtenidos.

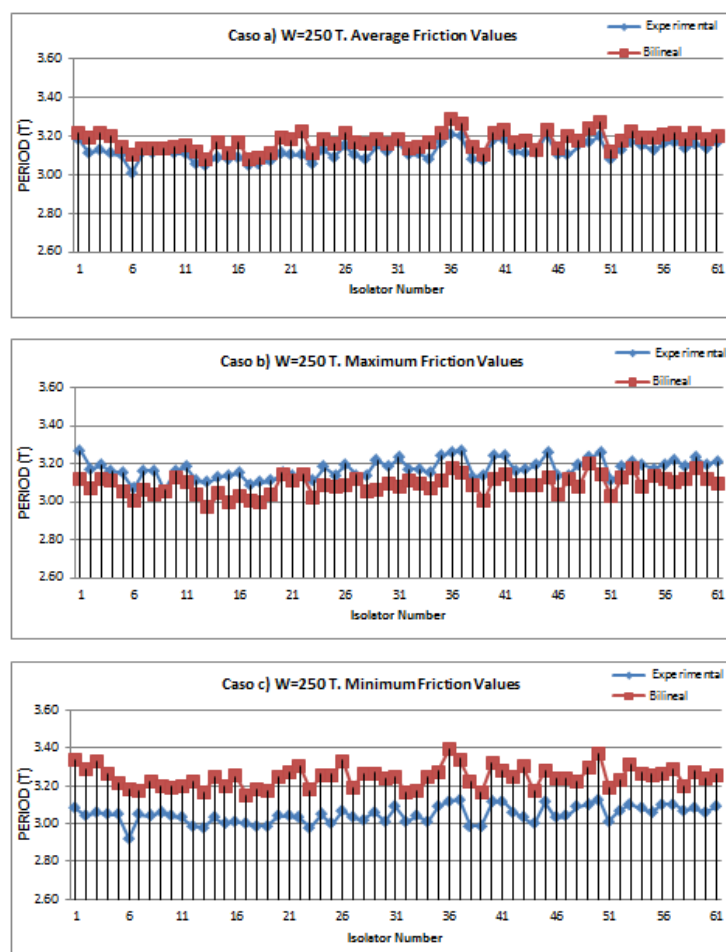


Figura 17 Comparación de factor de amortiguamiento equivalente, para carga vertical de 250 T., de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

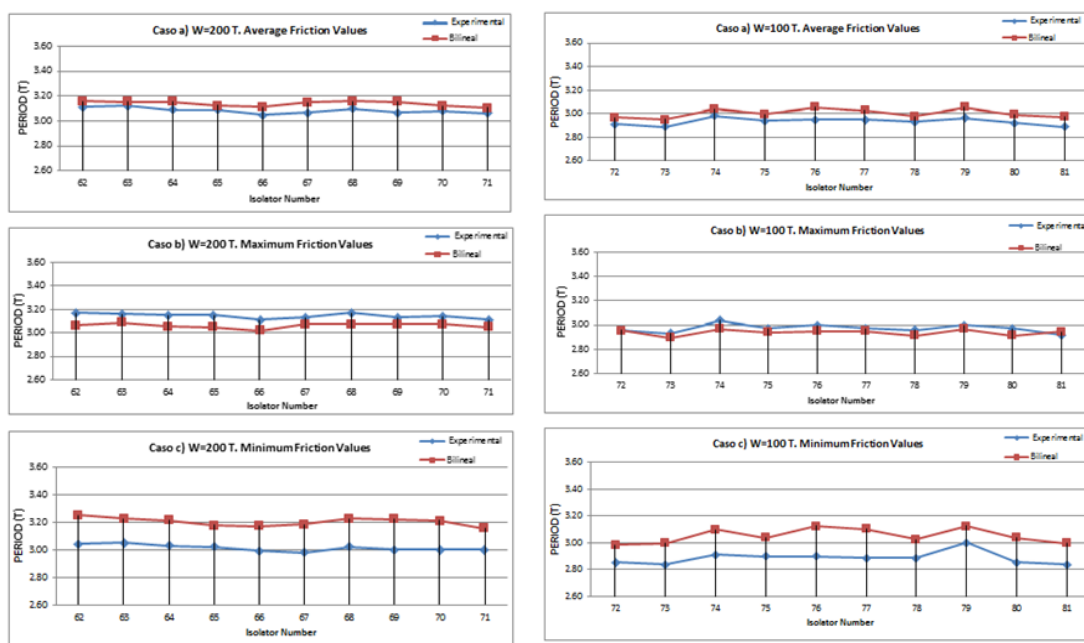


Figura 18 Comparación de Períodos, para carga vertical de: 200 T. (izquierda) y 100 T. (derecha), de carga vertical, a) con valores promedios de roce; b) con valores máximos de coeficiente de roce y c) con valores mínimos de coeficiente de roce.

VARIACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Dos puntos interesan comparar con los resultados obtenidos, el primero la variación que tiene la rigidez efectiva, factor de amortiguamiento equivalente y período encontrados experimentalmente y segundo comparar esos resultados con los que se hallan con el modelo propuesto. Para este objetivo en las tablas 1 a 3 se presentan los valores medios y desviación estándar con los datos de las figuras 13 a 18.

Tabla 1 Variación de la rigidez efectiva encontrada con valores: Promedio, Máximos y Mínimos para tres condiciones de carga vertical.

Valores	Modelo	$W = 250 T.$		$W = 200 T.$		$W = 100 T.$	
		\bar{k}_{ef} $\left(\frac{T}{m}\right)$	$\sigma_{K_{ef}}$ $\left(\frac{T}{m}\right)$	\bar{k}_{ef} $\left(\frac{T}{m}\right)$	$\sigma_{K_{ef}}$ $\left(\frac{T}{m}\right)$	\bar{k}_{ef} $\left(\frac{T}{m}\right)$	$\sigma_{K_{ef}}$ $\left(\frac{T}{m}\right)$
Promedio	Experimental	101.49	3.12	83.02	1.15	45.91	0.97
	Propuesto	99.92	2.96	81.67	1.02	44.62	1.13
Máximos	Experimental	106.32	3.11	86.88	1.37	47.61	0.92
	Propuesto	105.51	3.49	85.87	1.07	46.57	0.76
Mínimos	Experimental	97.95	2.92	79.98	1.22	44.69	1.02
	Propuesto	95.60	3.26	78.45	1.50	43.18	1.56

Tabla 2 Variación del factor de amortiguamiento encontrado con valores: Promedio, Máximos y Mínimos para tres condiciones de carga vertical.

Valores	Modelo	$W = 250 T.$		$W = 200 T.$		$W = 100 T.$	
		$\bar{\xi}$	σ_{ξ}	$\bar{\xi}$	σ_{ξ}	$\bar{\xi}$	σ_{ξ}
Promedio	Experimental	0.25	0.0103	0.2634	0.0043	0.29	0.0062
	Propuesto	0.27	0.0109	0.2864	0.0045	0.31	0.0089
Máximos	Experimental	0.27	0.0089	0.2788	0.0036	0.30	0.0042
	Propuesto	0.29	0.0116	0.3037	0.0044	0.33	0.0051
Mínimos	Experimental	0.24	0.0099	0.2527	0.0053	0.28	0.0093
	Propuesto	0.26	0.0135	0.2718	0.0073	0.30	0.0133

Tabla 3 Variación del Período encontrado con valores: Promedio, Máximos y Mínimos para tres condiciones de carga vertical.

Valores	Modelo	$W = 250 T.$		$W = 200 T.$		$W = 100 T.$	
		\bar{T} (s.)	σ_T (s.)	\bar{T} (s.)	σ_T (s.)	\bar{T} (s.)	σ_T (s.)
Promedios	Experimental	3.12	0.0443	3.08	0.0222	2.93	0.0297
	Propuesto	3.17	0.0471	3.14	0.0195	3.00	0.0384
Máximos	Experimental	3.17	0.0499	3.14	0.0220	2.97	0.0349
	Propuesto	3.08	0.0509	3.06	0.0191	2.94	0.0239
Mínimos	Experimental	3.04	0.0441	3.01	0.0226	2.88	0.0465
	Propuesto	3.24	0.0559	3.20	0.0306	3.05	0.0554

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Cabe indicar que el modelo bilineal propuesto es consistente y proporciona una estimación de la respuesta de la estructura, que podría ser compatible con los comentarios de Mc Vitty y Constantinou.

El modelo propuesto es validado con los datos experimentales proporcionados por EPS, en base al aislador friccional utilizado en el Nuevo Centro de Investigaciones de la Universidad de Fuerzas Armadas, Espe.

Los valores de Rigideces, Amortiguamiento y periodos del modelo experimental y propuesto con valores máximos, mínimos y promedio permite observar que el modelo analítico bilineal es compatible con el experimental.

REFERENCIAS

1. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008), *Aisladores elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército ESPE, 242 p.
2. Chistopoupoulus, C. and Filiatraul, A. (2006). Principles of passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. IUSS Press, Instituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Pavia, Pavia, IT.
3. Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M. and Warn G. P. (2007), "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading," Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report MCEER-07-0012, Buffalo, NY.
4. Constantinou M., Aguiar R., Morales E., Caiza P., (2016), "Desempeño del aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado de la UFA-ESPE" *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **21** (1), 1-25. <http://www.riie.espe.edu.ec>
5. Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M. and Warn G. P. (2007), "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading," Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report MCEER-07-0012, Buffalo, NY.
6. Fadi F., and Constantinou M. (2010), "Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 5-22.
7. Fenz, D. and Constantinou, M.C. (2006), "Behavior of Double Concave Friction Pendulum Bearing," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 11, 1403-1424.
8. Fenz D., Constantinou M., (2007), Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings, Technical Report **MCEER-08-0007**, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Mechanical-Behavior-of-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0007.html>
9. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C., (2008), *Development, implementation and verification of Dynamic Analysis Models for Multi-Spherical sliding bearings*. Report No. **MCEER-08-0018**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Development-Implementation-and-Verification-of-Dynamic-Analysis-Models-for-Multi-Spherical-Sliding-Bearings-MCEER-08-0018.html>
10. Keri, R., Eiji, S., Tomohiro, S., Nhan, D., and Taichiro, O., (2012), "Observations From NEES/E-DEFENSE Tests of a Full Scale Isolated and Fixed-Base Building", 9th International Conference on Urban Earthquake

-
- Engineering/ 4th Asia Conference on Earthquake Engineering March 6-8, 2012, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan
11. Kawamura S., Sugisaki R., Ogura K., Maezawa S., Tanaka S., Yajima A., (2000), "Seismic Isolation retrofit in Japan", *12 World Conferences on Earthquake Engineering WCEE*, **2523**, 8p. New Zeland.
 12. Lee D., Constantinou M., (2016), "Quintuple Friction Pendulum Isolator-Behavior, modeling and validation", *Earthquake Spectra*,
 13. McVitty, W.J. and Constantinou, M.C., (2015), *Property modification factors for seismic isolators: Design Guidance for Buildings*, Technical Report No. **MCEER-15-0005**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 2015. Available at <http://mceer.buffalo.edu/publications/catalog/reports/Property-Modification-Factors-for-Seismic-Isolators-Design-Guidance-for-Buildings-MCEER-15-0005.html>
 14. Naeim, C., and Kelly, J.M., *Desing of Seismic Isolation Structures* , John Wiley & Sons Inc., 1999.
 15. Zayas, V. *Seismic Isolation Desing for Resilient Building , Base Isolation Systems: Applications, Codes & Quality Control Tests*", Istanbul Technical University, 2013.